

# Simulasi Lompatan Hidrolik pada Aliran Kanal Terbuka Menggunakan Pendekatan Komputasi Dinamika Fluida

Desti<sup>a\*</sup>, Yoga Satria Putra<sup>a</sup>, Arie A. Kushadiwijayanto<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Geofisika FMIPA Universitas Tanjungpura

<sup>b</sup>Program Studi Ilmu Kelautan FMIPA Universitas Tanjungpura

\*Email : desti@student.untan.ac.id

(Diterima 31 Juli 2021; Disetujui 29 Agustus 2021; Dipublikasikan 31 Agustus 2021)

## Abstrak

Proses terjadinya lompatan hidrolik dalam bidang pertanian dapat terjadi di saluran irigasi. Aliran air yang mengalir dari daerah hulu pintu air akan menabrak air yang ada di daerah hilir pintu air. Ketika pintu air tersebut dibuka maka akan terjadi lompatan hidrolik. Fenomena lompatan hidrolik dalam sebuah kanal terbuka dapat dipelajari menggunakan pendekatan komputasi dinamika fluida. Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk membangun simulasi numerik lompatan hidrolik menggunakan perangkat lunak *open source* OpenFOAM dengan menerapkan model turbulen LES *Smagorinsky*. Selain itu, tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan profil kecepatan pada Bilangan *Froude* ( $Fr$ ) yang berbeda, serta menganalisis bentuk tipologi lompatan hidrolik berdasarkan nilai  $Fr$ . Berdasarkan uji grid hasil yang mendekati data acuan terdapat pada Tipe I. Nilai korelasi tertinggi dan *error* terendah terdapat pada Tipe II. Profil kecepatan dekat dasar saluran akan meningkat seiring dengan nilai  $Fr$  yang semakin besar. Pada zona yang berada pada kolom air atau pada kedalaman sekitar 0,01 m, kecepatan perlahan-lahan akan mulai menurun yang disertai dengan terjadinya kenaikan elevasi pada permukaan air. Pada zona yang semakin dekat ke permukaan, profil kecepatan mulai meningkat dan ini terjadi pada lima  $Fr$  yang berbeda. Nilai  $Fr = 1,3$  merupakan tipe lompatan berombak. Lompatan lemah terjadi pada saat nilai  $Fr = 1,8$ . Nilai  $Fr = 2,8$  merupakan lompatan berosilasi. Nilai  $Fr = 6,8$  merupakan lompatan tetap, dan nilai  $Fr = 9,8$  merupakan lompatan kuat.

Kata kunci : Lompatan hidrolik, Bilangan *Froude*, komputasi dinamika fluida, profil kecepatan, OpenFOAM

## 1. Latar Belakang

Lompatan hidrolik yang terjadi dalam saluran kanal terbuka, salah satunya adalah sungai, merupakan campuran turbulen antara udara dan air. Batuan di alam dan penghalang lainnya yang terdapat di sungai juga menyebabkan terjadinya lompatan hidrolik. Distribusi kecepatan aliran di bawah lompatan hidrolik berhubungan erat dengan nilai  $Fr$ . Laju transportasi sedimen sangat dipengaruhi oleh laju erosi di bagian hulu daerah aliran sungai, dan di daerah hilir keberadaan sedimen akan menimbulkan penurunan kualitas air, pendangkalan sungai, dan lainnya.

Penelitian mengenai lompatan hidrolik pernah dilakukan secara eksperimental dan studi teoritis oleh Aborahma (2016) menggunakan saluran di Laboratorium dengan sebuah penghalang yang mempunyai penampang melingkar. Caisley *et al.* (1999) telah mengkaji pembentukan lompatan hidrolik dengan nilai  $Fr = 6$  yang diteliti menggunakan model fisik dan numerik. Model numerik pada penelitian tersebut dibangun

berdasarkan padapersamaan *Reynold-average Navier – Stokes* (RANS) 2D. Hasil numerik dan pengukuran Laboratorium yang diperoleh sangat memuaskan. Fenomena lompatan hidrolik, profil kecepatan air di bawah permukaan dari lompatan hidrolik dan tipe-tipe lompatan hidrolik sebagai fungsi dari bilangan *Froude* dalam sebuah kanal terbuka dapat dipelajari menggunakan pendekatan komputasi dinamika fluida (*Computational Fluid Dynamics/CFD*). Dalam penelitian ini akan diterapkan model turbulen *Large Eddy Simulation* (LES) *Smagorinsky*.

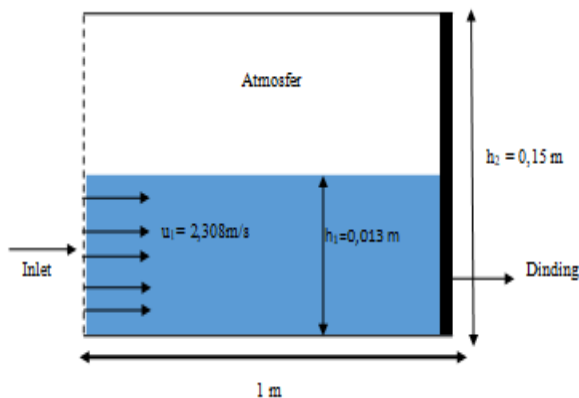
Selain dilakukan secara numerik, pemodelan juga dilakukan secara eksperimen dalam skala kecil di Laboratorium dengan geometri berbentuk persegi panjang. Hasil dari kedua model numerik menghasilkan studi yang sesuai dengan data eksperimental (Bayon *et al.*, 2016). Tipe lompatan yang berbeda akan mempengaruhi sebaran partikel sedimen pada sebuah aliran kanal terbuka seperti sungai, parit, dan sebagainya. Selain itu, dengan mempelajari lompatan hidrolik juga bisa

bermanfaat dalam bidang pertanian yaitu untuk mengurangi terjadinya pengikisan di sekitar pintu air.

## 2. Metodologi Penelitian

### 2.1. Pengaturan Domain Model

Domain komputasi yang digunakan dalam simulasi ini mengacu pada penelitian Bayon *et al.* (2016) yaitu dengan ukuran panjang 1 m, lebar 0,1 m, dan tinggi 0,15 m. Kedalaman aliran superkritik sebesar 0,013 m dan kecepatan aliran masuk sebesar 2,308 m/s.



**Gambar 1.** Domain komputasi simulasi lompatan hidrolis

### 2.2. Prosedur Validasi Model

Simulasi ini dilakukan validasi hasil dengan menguji parameter numerik yaitu uji grid. Jumlah grid diatur dengan cara mendiskritisasi domain komputasi dalam arah sumbu  $x$  dan sumbu  $y$ . Uji grid dua dimensi ( $\Delta x = \Delta y$ ) dibuat dengan lima tipe variasi ukuran grid yang berbeda.

**Tabel 1.** Tipe ukuran grid ( $\Delta x = \Delta y$ )

No	Tipe	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)
1	I	0,002	0,002
2	II	0,004	0,004
3	III	0,006	0,006
4	IV	0,008	0,008
5	V	0,01	0,01

### 2.3. Prosedur Analisis Hasil Model

Hasil penelitian yang diperoleh pada penelitian sebelumnya dari berbagai literatur didigitasi menggunakan perangkat lunak OpenFOAM. Lima tipe ukuran grid yang telah disimulasikan kemudian dianalisis bentuk permukaan bebasnya pada tampilan *paraview* di dalam OpenFOAM dengan interval waktu 1 s. Dari kelima tipe ukuran grid yang telah dibuat, dicari satu bentuk Grafik dari masing-masing tipe ukuran grid yang mendekati data acuan.

#### a. Korelasi

Kuat lemahnya hubungan  $\chi$  dan  $\Gamma$  dapat dilihat dari nilai korelasi yang diperoleh. Perhitungan nilai korelasi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n(\sum x^2) - (\sum x)^2)(n(\sum y^2) - (\sum y)^2)}} \quad (1)$$

Keterangan:

$r$  = nilai korelasi

$X$  = Nilai model

$Y$  = Nilai Bayon *et al.*, (2016)

$X'$  = Rata-rata nilai  $X$

$Y'$  = Rata-rata nilai  $Y$

$x = X - X'$

$y = Y - Y'$

#### b. Root Mean Square Error (RMSE)

Tingkat kesalahan hasil prediksi, dapat diketahui dari nilai RMSE, apabila nilai RMSE semakin kecil atau mendekati 0, maka semakin akurat hasil dari suatu prediksi. Nilai RMSE dihitung dengan persamaan di bawah ini:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X - Y)^2}{n}} \quad (2)$$

Keterangan:

$n$  = Jumlah data

### 2.4. Penentuan Nilai Kecepatan

Penentuan nilai  $u_1$  dilakukan untuk mengetahui hubungan  $u_1$  dan nilai kecepatan setelah terbentuknya lompatan hidrolis ( $u_h$ ) dan hubungan  $u_1$  terhadap nilai  $Fr$ . Dalam penelitian ini dibuat 5 simulasi dengan variasi nilai  $u_1$ . Variasi nilai  $u_1$  tersebut berdasarkan rentang nilai  $Fr$  yang terdapat pada Tabel 1. Rentang nilai  $Fr$  yang dijadikan acuan yaitu menurut Chow (1973) dan Chanson (2004). Nilai  $u_h$  dicari dengan melihat nilai kedalaman pada puncak tertinggi gelombang pertama yang terbentuk pada masing-masing simulasi. Nilai  $u_h$  dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$u_h = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

Keterangan:

$u_h$  = Kecepatan setelah terbentuknya lompatan hidrolik (m/s)

$x_1$  = Jarak gelombang pertama pada saat  $t = 1$  s (m)

$x_2$  = Jarak gelombang pertama pada saat  $t = 2$  s (m)

$t_1$  = Waktu pada saat  $x_1$  terbentuk (s)

$t_2$  = Waktu pada saat  $x_2$  terbentuk (s)

### 3. Hasil dan Pembahasan

Dalam pembahasan penelitian ini ada dua tahap yang dilakukan. Pertama adalah tahapan validasi hasil simulasi dan yang kedua adalah tahapan analisis hasil simulasi. Tahap validasi yang dibahas dalam penelitian ini adalah uji parameter berdasarkan variasi ukuran grid. Tahap analisis hasil simulasi yaitu perhitungan nilai  $\chi$  dan  $\Gamma$ , penentuan nilai kecepatan ( $u_1$ ), analisis profil kecepatan untuk setiap nilai  $Fr$  berdasarkan variasi nilai  $u_1$  dan analisis bentuk tipologi lompatan hidrolik berdasarkan nilai  $Fr$ .

#### 3.1. Validasi Simulasi dari Lompatan Hidrolik

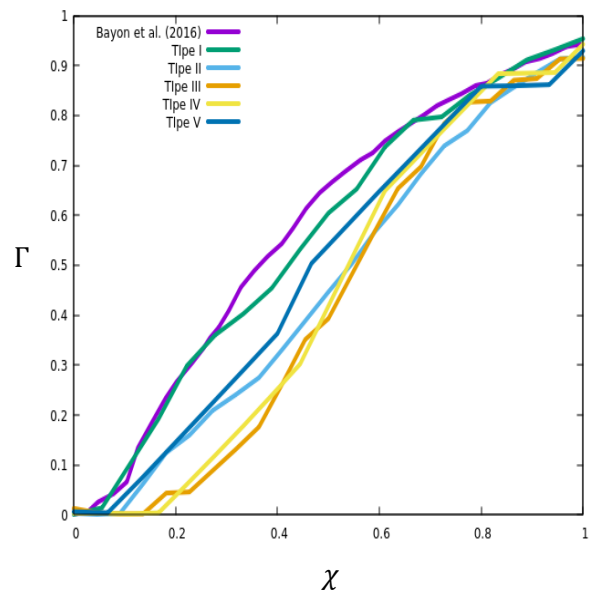
Validasi merupakan suatu tahapan atau proses yang dilakukan untuk mengukur kebenaran data yang diteliti (Hendri, 2009). Tujuan dari validasi adalah untuk mendapatkan hasil representatif dari suatu model yang lebih mendekati dengan data sebenarnya melalui beberapa pengujian data.

#### 3.2. Uji parameter berdasarkan variasi ukuran grid

Proses pembuatan lima simulasi berdasarkan variasi ukuran grid pada Tipe I, II, III, IV, dan V dari ukuran grid yang kecil sampai ukuran grid yang besar. Jumlah grid diatur ketika membangun domain komputasi. Semakin kecil ukuran grid semakin lama waktu yang diperlukan saat proses komputasi. Akan tetapi, semakin kecil ukuran grid akan semakin valid hasil yang didapatkan, namun komputer yang digunakan dalam perhitungan tidak memiliki spesifikasi yang tinggi sehingga terkendala dalam melakukan perhitungan data simulasi jika menggunakan ukuran grid yang sangat kecil.

Korelasi ( $r$ ) merupakan metode yang digunakan untuk menganalisis kuat lemahnya hubungan antar variabel bebas dan variabel terikat,

dimana variabel bebas dianggap mempengaruhi variabel terikat (Irianto, 2006). Nilai korelasi yang terdapat pada ukuran grid Tipe I sampai V mendekati +1, ini menunjukkan bahwa tingkat hubungan antar variabel sangat kuat (Sugiyono, 2014).



**Gambar 2.** Profil bentuk permukaan bebas berdasarkan variasi ukuran grid

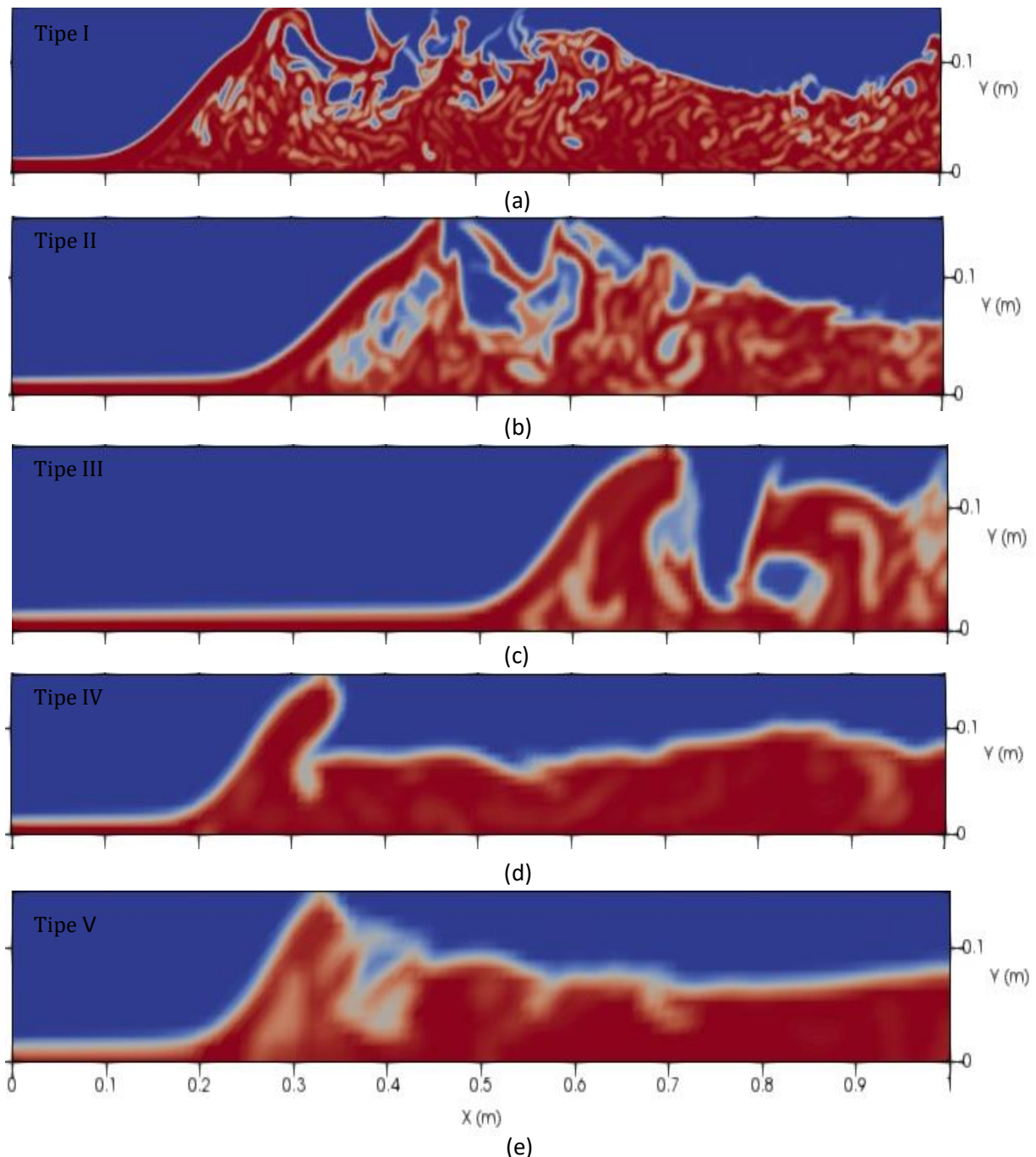
Gambar 2 menunjukkan bentuk permukaan bebas (*free surface*) dari lima tipe grid yang telah dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak OpenFOAM. Profil permukaan bebas merupakan nilai yang tidak berdimensi (*non-dimensional*). Kaidah yang umum terjadi adalah nilai korelasi paling akurat untuk  $\Delta x = \Delta y$  yang paling kecil, tetapi di dalam penelitian ini justru  $\Delta x = \Delta y$  lebih besar yang lebih akurat. Hal ini terjadi karena nilai yang dikorelasikan tidak sama persis dengan data acuan. Kesalahan ini bukan kesalahan dalam numerik melainkan *human error* pada saat melakukan digitasi. Akan tetapi, secara umum simulasi ini sudah mengikuti pola dari data acuan yang ada.

Apabila dianalisis secara visual dapat dilihat bahwa Tipe I lebih mendekati data acuan. Hal ini disebabkan ukuran grid pada Tipe I lebih kecil dibandingkan dengan ukuran grid lainnya sehingga didapat hasil simulasi yang lebih mendekati data acuan. Bentuk dari permukaan bebas untuk variasi ukuran kisi Tipe I, II, III, IV, dan V dapat ditampilkan pada Gambar 3 Hasil dari bentuk permukaan tersebut diambil pada tampilan *paraview* pada perangkat lunak OpenFOAM untuk lima simulasi yang berbeda.

Hasil simulasi juga memberikan gelombang yang memiliki semburan yang kuat. Hal ini dikarenakan kecepatan yang diterapkan di dalam simulasi besar dan geometri kanal tidak terlalu panjang.

### 3.4 Profil Kecepatan untuk Nilai $Fr$ yang Berbeda

Perubahan yang terjadi setelah terjadi aliran kritis, profil dari besarnya kecepatan dari lompatan hidroklik perlahan-lahan akan menurun seiring



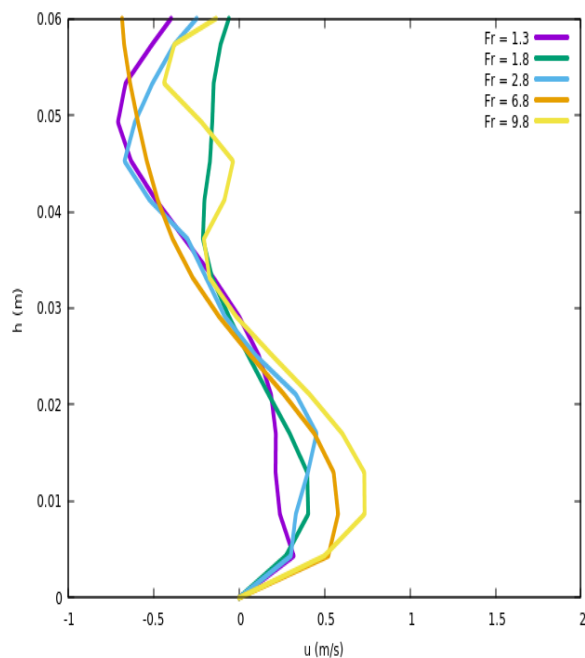
**Gambar 3.** Bentuk permukaan bebas pada ukuran grid Tipe (a) I, (b) II, (c) III, (d) IV, dan (e) V

dengan bertambahnya kedalaman menuju aliran subkritis.

### 3.3. Penentuan Parameter Kecepatan

Nilai  $Fr$  yang dihitung dengan memasukkan nilai  $u_1$  dan nilai  $u_h$  ternyata memiliki nilai  $Fr$  yang berbeda dari nilai yang ditetapkan. Nilai  $Fr$  yang diperoleh mengalami pengurangan sebesar 0,02.

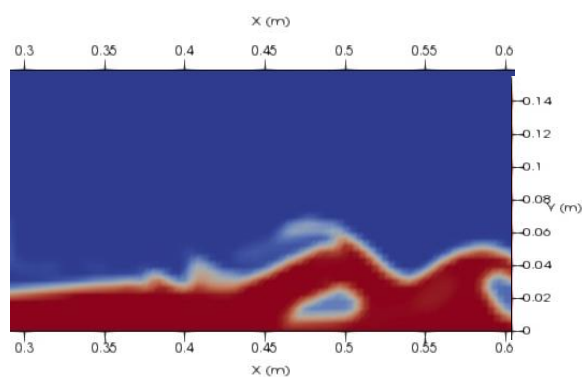
Bentuk permukaan bebas yang hampir mirip ternyata juga memberikan profil kecepatan yang hampir mirip. Semakin kecil nilai  $u_1$  yang diterapkan di dalam simulasi, semakin teratur bentuk gelombang yang terbentuk.



**Gambar 4.** Profil kecepatan untuk nilai  $Fr$  yang berbeda

Profil kecepatan dibagi ke dalam 3 zona yaitu dekat dasar saluran (*bed*), pada kolom air dan zona yang semakin mendekati permukaan. Kecepatan memiliki nilai yang tinggi pada zona dekat dasar saluran. Nilai kecepatan dekat dasar saluran akan meningkat seiring dengan nilai  $Fr$  yang semakin besar.

Zona yang berada pada kolom air atau pada kedalaman sekitar 0,01 m, kecepatan perlahan-lahan akan mulai menurun yang disertai dengan terjadinya kenaikan elevasi pada permukaan air. Zona yang semakin dekat ke permukaan, kecepatan mulai semakin meningkat dan ini terjadi untuk 5 nilai  $Fr$  yang berbeda. Semakin besar kecepatan memperlihatkan kedalaman yang tidak terlalu besar, ini dapat dilihat dari sedikit terjadinya kenaikan elevasi pada permukaan air.



$Fr = 1,3$  (Lompatan berombak)

Aliran yang memiliki kecepatan awal lebih besar dari kecepatan aliran kritis, perubahan secara tiba-tiba akan terjadi sehingga pada bagian depan daerah transisi akan pecah dan akan mengalami pembalikan arah yang disertai dengan turbulensi yang besar, jebakan udara, dan undulasi (gerakan seperti gelombang) di permukaan.

### 3.5 Bentuk Tipologi Lompatan Hidrolik Berdasarkan Nilai $Fr$

Bentuk tipologi lompatan hidrolik yang diperoleh dari 5 simulasi menggambarkan bentuk permukaan bebas. Berdasarkan variasi nilai  $u_1$  didapat nilai  $Fr$  yang berbeda untuk 5 simulasi.

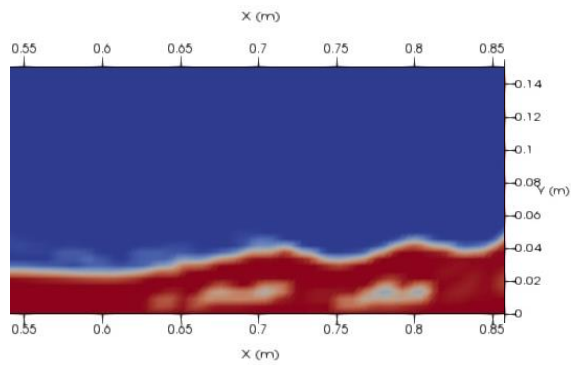
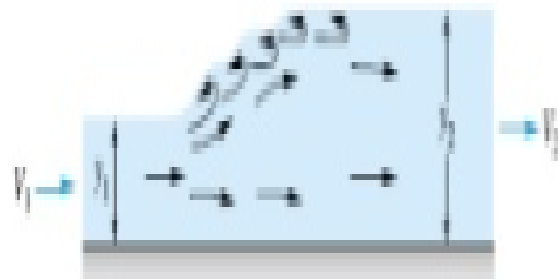
Hasil simulasi menunjukkan bentuk permukaan bebas yang berbeda dan kedalaman yang berbeda, hal ini karena simulasi dibuat memiliki kecepatan yang bervariasi. Nilai  $Fr = 1,3$  merupakan tipe lompatan berombak, hal ini disebabkan karena nilai  $Fr$  yaitu  $1 < Fr < 1,7$  yang dicirikan ombak terjadi di permukaan air. Nilai  $Fr = 1,8$  merupakan tipe lompatan lemah karena memiliki nilai  $Fr$   $1,7 < Fr < 2,5$  sehingga ombak pada permukaan lompatan membentuk serangkaian gelombang tanpa harus merubah kondisi permukaan air yang halus di daerah hilir.

Nilai  $Fr = 2,8$  merupakan tipe lompatan berosilasi karena memiliki nilai  $Fr$   $2,5 < Fr < 4,5$ . Dasar lompatan menuju ke permukaan dan pada periode tertentu dapat kembali lagi ke posisi awal sehingga terjadinya semburan. Osilasi dapat menimbulkan gelombang besar yang tidak terarah. Nilai  $Fr = 6,8$  merupakan tipe lompatan tetap karena memiliki nilai  $Fr$   $4,5 < Fr < 9$ . Nilai  $Fr = 9,8$  merupakan tipe lompatan kuat karena memiliki nilai  $Fr \geq 9$ . Gelombang pada daerah hilir terbentuk karena adanya kecepatan semburan yang cukup tinggi sehingga menimbulkan hamparan gulungan gelombang di permukaan lompatan. Untuk lebih jelas ditampilkan pada gambar 5 di bawah ini.

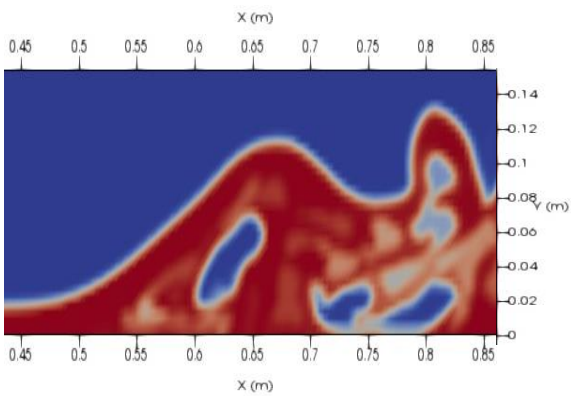


Tipe Lompatan berombak (Chow, 1989)

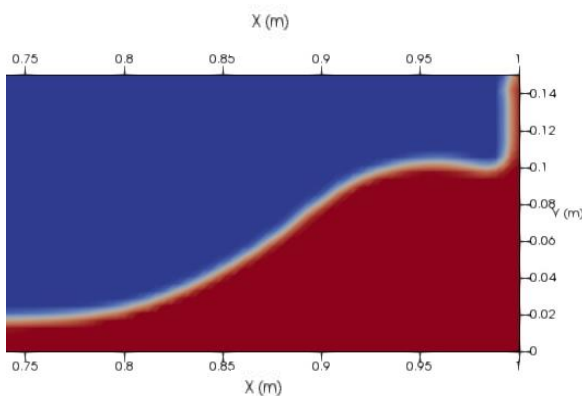


 $Fr = 1,8$  (Lompatan lemah)

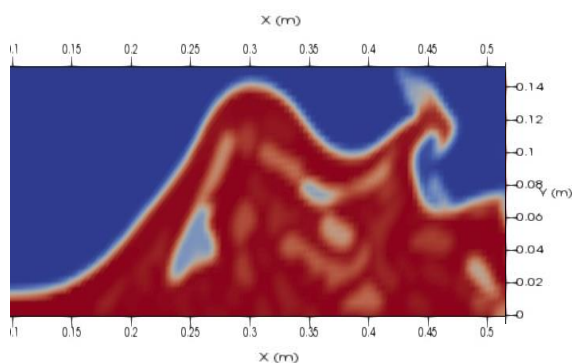
Tipe Lompatan lemah (Chow, 1989)

 $Fr = 2,8$  (Lompatan berosilasi)

Tipe Lompatan berosilasi (Chow, 1989)

 $Fr = 6,8$  (Lompatan tetap)

Tipe Lompatan tetap (Chow, 1989)

 $Fr = 9,8$  (Lompatan kuat)

Tipe Lompatan kuat (Chow, 1989)

**Gambar 5.** Bentuk tipologi lompatan hidrolik berdasarkan nilai  $Fr$

#### 4 Kesimpulan

Simulasi lompatan hidrolik dalam aliran kanal terbuka yang dibangun di dalam perangkat lunak OpenFOAM telah berhasil disimulasikan dengan pendekatan komputasi dinamika fluida. Semakin besar nilai  $u_1$  semakin besar juga nilai  $Fr$  yang diperoleh, semakin kecil nilai  $u_1$  maka nilai  $Fr$  yang diperoleh juga akan semakin kecil.

Nilai kecepatan dekat dasar saluran akan meningkat seiring dengan nilai  $Fr$  yang semakin besar. Zona yang berada pada kolom air atau pada kedalaman sekitar 0,01 m, kecepatan perlahan-lahan akan mulai menurun yang disertai dengan terjadinya kenaikan elevasi pada permukaan air. Zona yang semakin dekat ke permukaan, profil kecepatan mulai semakin meningkat dan ini terjadi untuk 5 nilai  $Fr$  yang berbeda.

Berdasarkan nilai  $Fr$  yang berbeda, nilai  $Fr = 1,3$  merupakan tipe lompatan berombak. Lompatan lemah terjadi pada saat nilai  $Fr = 1,8$ . Nilai  $Fr = 2,8$  merupakan lompatan berosilasi. Nilai  $Fr = 6,8$  merupakan lompatan tetap, dan nilai  $Fr = 9,8$  merupakan lompatan kuat.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aborahma, R. 2016. *Hydraulic Jump in Circular Open Channel*. May.
- [2] Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F. J., & López-Jiménez, P. A. (2016). Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling and Software*, 80, 322–335.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>.
- [3] Caisley, M. E., Bombardelli, F.A.& Garcia, M. H. 1999. Hydraulic model study of a Canoe Chute for low-head Dans in Illinois (HES 63). Hydraulic Engineering Series 63. <http://hdl.handle.net/2142/12214>.
- [4] Chanson, H. 2004. *Hidrolik Aliran Saluran Terbuka*. Oxford, Inggris
- [5] Chow, V.T. 1973. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill. New York
- [6] Chow, V.T. 1989. *Hidrolika Saluran Terbuka*. Erlangga. Jakarta
- [7] Irianto, Agus. 2006. *Statistik: Konsep Dasar dan Aplikasi*. Kencana. Jakarta.
- [8] Hendri, Jhon. 2009. *Riset Pemasaran. Merancang Kuesioner*. Universitas Gunadarma
- [9] Sugiyono. 2014. *Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung. Alfabeta